

# Relaxationsverluste bei Vorspanndrähten

Spannbetonbauteile sind anfällig für Relaxationsverluste, deren Berücksichtigung für die Tragwerksplanung von signifikanter Bedeutung ist. Spanndrähte werden nach der Herstellung zur Vereinfachung von Lagerung und Transport auf Coils gewickelt. Eventuelle nachteilige Auswirkungen dieser Vorgehensweise auf das Relaxationsverhalten von Spannstahldrähten werden in der Regel vernachlässigt, obwohl Hersteller sowie Bauunternehmer durch Relaxationsversuche nach langen Lagerzeiten festgestellt haben, dass der Relaxationsverlust in einigen Fällen höher ausfiel als kurz nach der Herstellung. Daher wird der Einfluss des Aufwickelns auf den Relaxationsverlust durch eine experimentelle Untersuchung überprüft und durch die Anwendung eines einfachen Analysemodells bestätigt. Die Ergebnisse zeigen, dass einige Faktoren wie die Anfangsspannung, Langzeitlagerung oder Lagerung bei hohen Temperaturen Relaxationsverluste auslösen oder verstärken können. Es wird jedoch auch gezeigt, dass diese Auswirkungen unter Berücksichtigung der Anforderungen der entsprechenden Richtlinien (Minstdurchmesser Coil) vernachlässigt werden können.

■ Fernando Suárez, Manuel Elices, Jaime C. Gálvez, José Miguel Atienza, David A. Condón, Polytechnische Universität Madrid, Spanien ■

Aktive Bewehrung kann durch Relaxation, d. h. eine Abnahme der Spannung des Spannstahls, beeinträchtigt werden. Dieses Phänomen ist bei der Konstruktion von Spannbetontragwerken in besonderer Weise zu berücksichtigen, da die Tragwerkssicherheit andernfalls nicht gewährleistet ist. Um die Auswirkungen dieses Phänomens unter einer definierten Obergrenze zu halten, sollten sie mit Hilfe genormter Verfahren (ISO 15630-3 [1] und ASTM E328-86 [2]) geprüft werden; die Ergebnisse sollten sich innerhalb der in den Normen festgelegten Grenzen bewegen. Hierzu werden Messungen an Spanndrähten durchgeführt, und zwar unmittelbar nach der Herstellung sowie nach unterschiedlich langen Lagerzeiträumen auf dem Coil, die bis zu ein Jahr betragen können.

In vorangegangenen Untersuchungen standen vor allem der Einfluss der Temperatur [3, 4] auf den Relaxationsverlust sowie die zur Reduzierung der während des Kaltziehverfahrens generierten Eigenspannung angewandte stabilisierende Behandlung im Vordergrund [5, 6]. Die Auswirkungen des Aufwickelns und der Lagerung wurden jedoch in der Regel vernachlässigt, und entsprechende Untersuchungen wurden nicht durchgeführt.

Durch experimentelle Untersuchungen wurde nachgewiesen, dass der Relaxationsverlust bei Drähten, die über einen langen Zeitraum gelagert werden, zunimmt. Die Autoren sind der Ansicht, dass dies

auf den beim Aufspulen des Drahtes induzierten Relaxationsverlust zurückzuführen ist, der für die nach dem Abwickeln beobachtete endgültige Krümmung verantwortlich ist (Abb. 1).

In den einschlägigen Normen [7, 8] finden sich keine Hinweise auf dieses Phänomen, dennoch werden für die verschiedenen Spannstahltypen unter Berücksichtigung der Abmessungen Grenzwerte für den Durchmesser der Coils angegeben (siehe Tab. 1). Wenn gleich der Zweck dieser Grenzwerte darin besteht, übermäßig hohe Spannungen im Drahtquerschnitt zu verhindern, können diese ausreichen, um einen lokalen Relaxationsprozess zu ermöglichen. Neben diesen Grenzwerten wird in einigen Normen [7] die praktische Überprüfung durch die Messung der Sagitta  $h$  an einem 1 m langen Draht nach dem Abwickeln empfohlen (Abb. 1).

Im vorliegenden Beitrag werden die Auswirkungen des Aufwickelns und der Langzeitlagerung auf den Relaxationsverlust untersucht, zudem soll eine Erklärung für die verbleibende Krümmung nach einer langen Lagerdauer gefunden werden. Drei wesentliche Faktoren werden analysiert: der Durchmesser des Coils, der Lagerzeitraum und die durch den Herstellungsprozess induzierte Eigenspannung. Zur Bewertung der beiden ersten Faktoren wird ein Versuchsprogramm zur Prüfung kaltgezogener Drähte mit 7 mm Durchmesser entwickelt. Verwendet werden drei Coildurchmesser, und die Drähte werden jeweils nach dem Abwickeln bei zwei verschiedenen Spannungsverhältnissen, nämlich bei 70 % der maximalen Zugspannung (ultimate tensile strength, UTS) sowie 80 % der UTS geprüft. Die im Rahmen dieses Versuchsprogramms gewonnenen Ergebnisse veranschaulichen den Einfluss des Aufwickelns auf das Relaxationsverhalten des Materials.

Ergänzend zu den Versuchen wird ein Analysemodell zur Simulation der Problemstellung entwickelt. Es basiert auf der Berechnung von Spannungen und Verformungen bei jedem Schritt des Aufwicklungs-, Lagerungs- und Abwicklungsprozesses sowie einem im An-

Tab. 1: Minstdurchmesser Coil [7]

Spannstahltyp	Minstdurchmesser Coil
Drähte	225 x $\phi_{\text{Draht}}$
Litzen (2- oder 3-drähtig)	600mm
Litzen (7-drähtig)	750mm

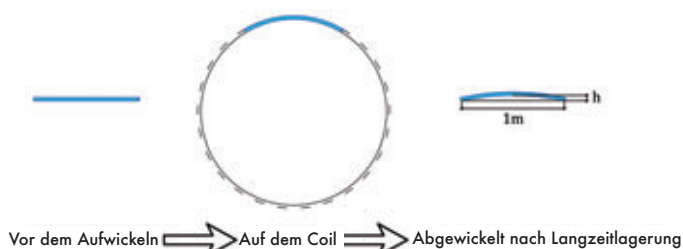


Abb. 1: Schematische Darstellung der Auswirkungen des Aufwickelvorgangs auf einen Draht nach Langzeitlagerung

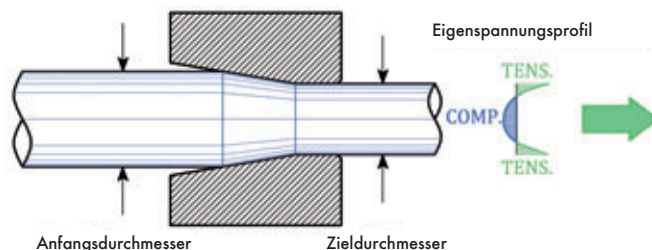


Abb. 2: Schematische Darstellung des Kaltziehverfahrens COMP. – Druckspannung, TENS. – Zugspannung



■ Fernando Suárez absolvierte ein Studium im Fach Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Madrid und verfügt über Erfahrungen in den Bereichen Brückenbau und Betonfertigteilbrücken, in denen er vier Jahre lang tätig war. Im Jahr 2009 nahm er als Doktorand seine Forschungstätigkeit auf und arbeitet derzeit an seiner Dissertation über Bruchmechanismen in Vorspanndrähten. [fsuarez@caminos.upm.es](mailto:fsuarez@caminos.upm.es)



■ Manuel Elices ist ordentlicher Professor für Materialwissenschaft und Werkstofftechnologie an der Technischen Universität Madrid sowie Dekan der Fakultät Werkstofftechnik. Der Schwerpunkt seiner Tätigkeit und seines Forschungsinteresses liegt auf dem Bereich Materialwissenschaft. Prof. Elices ist ausländisches Mitglied der National Academy of Engineering (USA) und der Europäischen Akademie (Sektion Materialwissenschaft). [melices@mater.upm.es](mailto:melices@mater.upm.es)



■ Jaime C. Gálvez ist ordentlicher Professor für Materialwissenschaft und Bauwesen an der Polytechnischen Universität Madrid (UPM) und Prodekan der Fakultät Bauingenieurwesen. Er promovierte im Jahr 1992 an der UPM. Zu seinen Forschungsinteressen zählen neuartige Betonsorten, insbesondere die Untersuchung von Beschädigungs- und Abnutzungsprozessen zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit sowie die Schadenstoleranz von Spann- und Baustählen. [Jaime.galvez@upm.es](mailto:Jaime.galvez@upm.es)



■ José Miguel Atienza unterrichtet am Fachbereich Materialwissenschaft an der Technischen Universität Madrid in Spanien, an der er 1998 als Forscher angefangen hatte. 2002 wurde er von der Real Academia de Doctores de España (Beste Dissertation in Materialwissenschaft) und vom ANCI (Beste Dissertation im Bauingenieurwesen) für seine Arbeit zum Thema „Eigenspannungen kaltgezogener Stahldrähte“ ausgezeichnet. Sein Forschungsinteresse gilt den Bereichen Spannstahldrähte und Biomaterialien. [jmatienza@mater.upm.es](mailto:jmatienza@mater.upm.es)



■ Dr. David A. Cendón ist Associate Professor am Fachbereich Materialwissenschaft an der Technischen Universität Madrid in Spanien. Er hat über 20 wissenschaftliche Beiträge in begutachteten internationalen Publikationen des SCI veröffentlicht sowie mehr als 60 Beiträge auf nationalen und internationalen Konferenzen und Kongressen präsentiert. Sein Forschungsinteresse gilt der Bruchmechanik von Beton und quasi-spröden Materialien sowie den Versagensmechanismen metallischer Materialien. [dcendon@mater.upm.es](mailto:dcendon@mater.upm.es)

schluss daran durchgeführten Relaxationsversuch. Das Modell wird durch einen Vergleich mit den zuvor beschriebenen experimentellen Versuchen validiert.

## Versuchsprogramm

### Mechanische Eigenschaften der Drähte

Bei dem im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojekts verwendeten Spannstahl handelt es sich um Drähte, die im Kaltziehverfahren aus Stäben aus eutektoidem Stahl mit einem Durchmesser von 12 mm in einem industriellen Verfahren gefertigt wurden. Nach sechs Ziehdurchgängen wurde der Zieldurchmesser von 7 mm erreicht. Durch dieses Verfahren wurden Eigenspannungen mit Zugspannungen an der Oberfläche generiert [9] (siehe Abb. 2), die mit Hilfe einer thermomechanischen Behandlung, auch als Stabilisierung bezeichnet, abgebaut werden [10].

Es wurden Zugfestigkeitsversuche gemäß ISO 15630.3 [1] durchgeführt (Ergebnisse in Tab. 2). Darüber hinaus wurden Relaxationsversuche bei unterschiedlichen Anfangsspannungen gemäß ASTM E328 [2] durchgeführt (Abb. 3).

Tab. 2: Materialeigenschaften der geprüften Drähte

$\sigma_{0.1}$ (MPa)	$\sigma_{0.2}$ (MPa)	$\sigma_{uts}$ (MPa)	$\epsilon_m$ (%)
1679	1704	1823	5.79

WELTWEIT

KOMPETENT

KÜBELBAHNANLAGEN

BETONVERTEILERANLAGEN



Einschienebahn Kippkübel



Bodenentleerkübel



Zweischienebahn Kippkübel



Bodenentleerkübel



Halbportalverteiler



Schrägaufzug



Halbportalverteiler



Deckenfertiger

Verwaltung  
und Produktion  
in Deutschland

**KÜBAT**  
Förderanlagen GmbH  
Max-Planck-Str. 14  
D-88361 Altshausen

Telefon: 0 75 84/92 09-0  
Telefax: 0 75 84/92 09-20  
E-Mail: [info@kuebat.de](mailto:info@kuebat.de)  
Internet: [www.kuebat.de](http://www.kuebat.de)



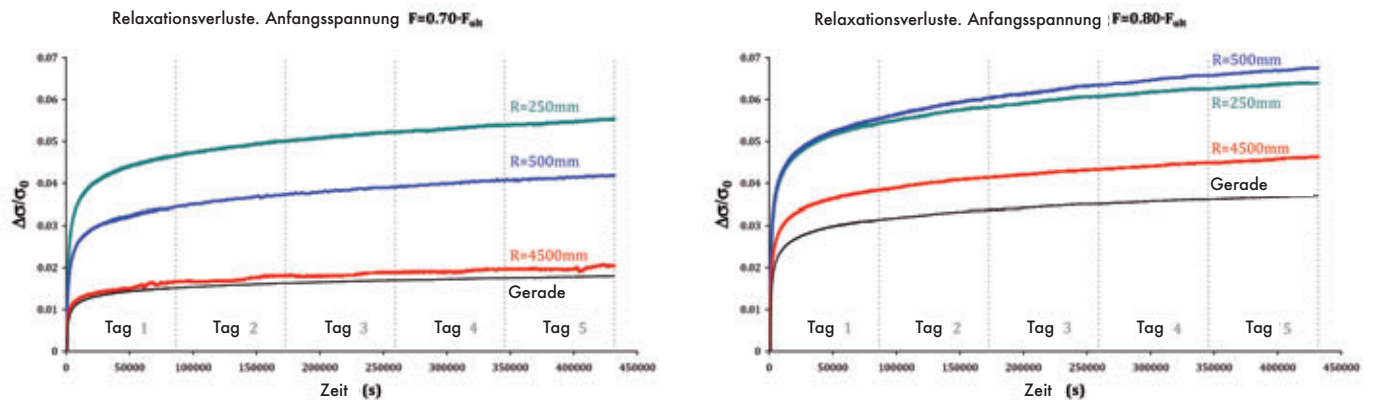


Abb. 3: Relaxationsverluste der betrachteten Coildradien in einem 120-stündigen Relaxationsversuch: a) Versuche bei 70 % der maximalen Zugspannung, b) Versuche bei 80 % der maximalen Zugspannung

### Auf- und Abwickeln der Drähte

Zur Prüfung des Einflusses des Coildurchmessers wurden zwei Chargen Draht mit geringeren Durchmessern als in den einschlägigen Normen empfohlen [7, 11] und eine dritte mit dem empfohlenen Mindestdurchmesser aufgewickelt. Alle drei Chargen blieben für die Dauer von 120 Stunden aufgewickelt.

Nach dem Abwickeln waren die Drähte nicht mehr gerade, sondern wiesen Krümmungen auf, die dem Umfang von Kreisen mit 500 mm, 1.000 mm beziehungsweise 9.000 mm Durchmesser entsprachen.

### Relaxationsversuche

Die Relaxationsversuche wurden mit zwei unterschiedlichen Anfangsspannungen – 70 % und 80 % der UTS – bei Raumtemperatur und über einen Zeitraum von bis zu 120 Stunden durchgeführt (Abb. 3). Die Ergebnisse sind in Tab. 3 dargestellt. Bei den Werten handelt es sich um aus jeweils drei Versuchen ermittelte Durchschnittswerte.

Tab. 3: Relaxationsverluste der geprüften Drähte: Vergleich der Versuchswerte mit den unter Verwendung des Analysemodells errechneten Werten. Die Verluste sind als Prozentsatz der Anfangsspannung dargestellt

Durchmesser abgewickelt	VERSUCHE		MODELL		Eigen- spannung* (MPa)	h (mm)
	Relaxationsverlust $F = 0.70 F_{\text{ult}}$ ( $\Delta\sigma/\sigma_0$ )	Relaxationsverlust $F = 0.80 F_{\text{ult}}$ ( $\Delta\sigma/\sigma_0$ )	Relaxationsverlust $F = 0.70 F_{\text{ult}}$ ( $\Delta\sigma/\sigma_0$ )	Relaxationsverlust $F = 0.80 F_{\text{ult}}$ ( $\Delta\sigma/\sigma_0$ )		
Gerade	1.80%	3.70%	---	---	---	0
D = 9000mm	1.91%	4.64%	2.34%	4.35%	80	28
D = 1000mm	4.04%	6.75%	4.25%	6.73%	100	500
D = 500mm	5.44%	6.39%	5.96%	7.85%	120	---

\* Durchschnittliche Eigenspannung an der Oberfläche

\*\* Die Sagitta h ist in Abb. 1 dargestellte und erläuterte Abstand

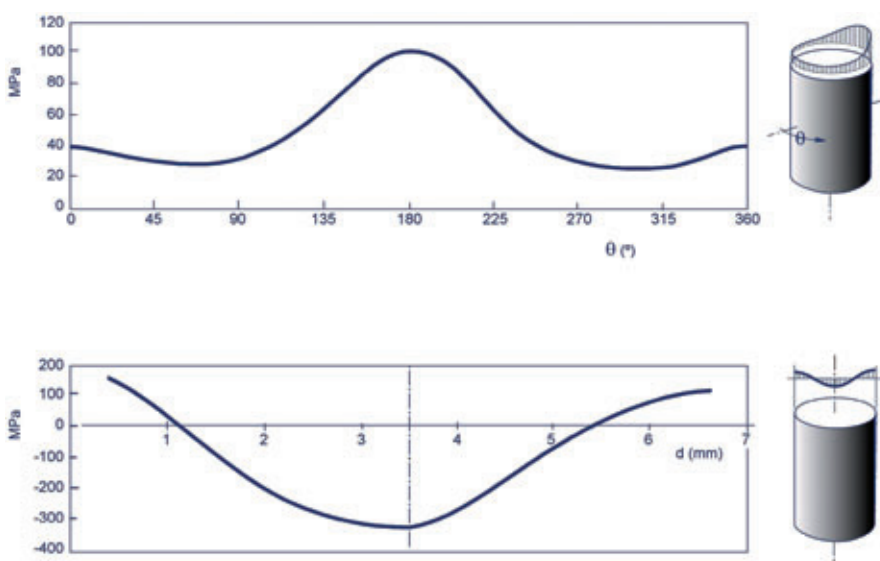


Abb. 4: An den geprüften Drähten gemessene Eigenspannungen: oben) entlang dem Umfang; unten) über den Durchmesser

### Eigenspannung

Die nach der Stabilisierung verbliebene Eigenspannung wurde entlang des Umfangs und über den Durchmesser des Drahtes gemessen (siehe [5] für weitere Details). Diese Messwerte sind in Abb. 4 dargestellt.

### Vorhersage des Relaxationsverlustes

Angewendet wurde ein einfaches Modell zur Erklärung der Versuchsergebnisse sowie zur Vorhersage des Einflusses des Coildurchmessers neben weiteren Parametern wie der Lagerdauer und der durch die Herstellung induzierten Eigenspannung auf die Spannungsrelaxation von Stahldrähten.

### Analysemodell zur Untersuchung des Einflusses des Aufwickelvorgangs

Dieses Modell basiert auf der Hypothese von Navier („ebene Querschnitte bleiben auch nach der Verformung eben“) sowie den Eingabedaten der Spannungs-Dehnungs-Kurve des Materials und der Relaxationsverlustkurve der unterschiedlichen Anfangsspannungen (Abb. 5).

Der Verlauf der Spannungsprofile eines Drahtquerschnitts während eines Aufwicklungs-, Lagerungs- und Abwicklungsprozesses ist in Abb. 6 dargestellt und könnte wie folgt zusammengefasst werden (der Einfachheit halber wurden Eigenspannungen nicht berücksichtigt):

· Profil 0 – Anfangszustand: Keine Spannung

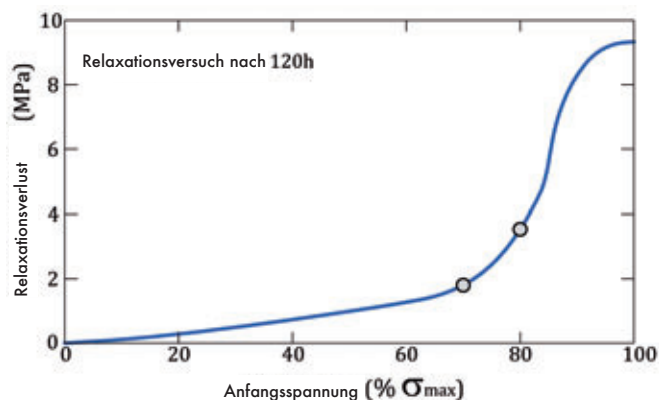


Abb. 5: Verhalten von Draht im Relaxationsversuch mit unterschiedlichen Anfangsspannungen

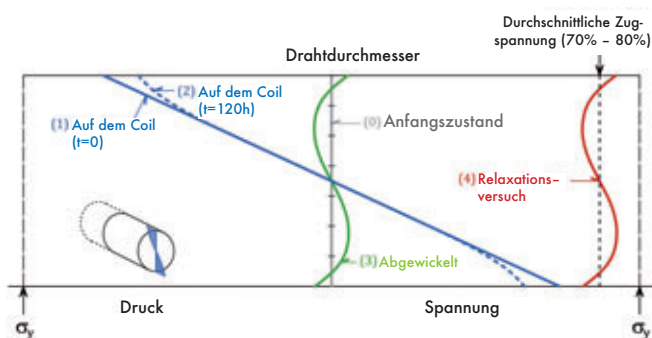


Abb. 6: Spannungsprofile eines Drahtes ohne Berücksichtigung der Anfangsspannung während des Auf- und Abwickelvorgangs

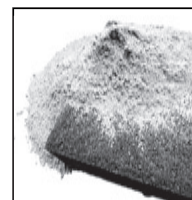
- Profil 1 – Nach dem Aufwickeln, durch Biegemoment: Es ist zu beachten, dass in diesem Beispiel alle Spannungen unterhalb der Fließspannung bleiben.
- Profil 2 – Nach einer bestimmten Zeit auf dem Coil: Zugspannungen nehmen gemäß Abb. 5 sogar im elastischen Bereich ab. Aufgrund dieser Tatsache ist die Verteilung des Spannungsverlustes über den Drahtquerschnitt inhomogen und in den äußeren Fasern höher.
- Profil 3 – Nach dem Abwickeln: Das Spannungsprofil wurde durch Subtraktion des oben genannten externen Moments zum Ausgleich der entsprechenden Belastung ermittelt. Es ist zu beachten, dass eine gewisse Spannung fortbesteht, obwohl das Gesamtspannungsprofil in sich ausgeglichen ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Spannungsverlust ungleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist.
- Profil 4 – Am Anfang des Relaxationsversuchs (bei 0,70 der UTS in diesem Beispiel). Durch den Vorgang des Auf- und Abwickeln fällt die Spannungsverteilung über den Querschnitt am Anfang des Relaxationsversuchs keinesfalls gleichmäßig aus. Der Relaxationsverlust des Drahtes besteht aus der Summe der über den gesamten Querschnitt entstandenen Abnahmen. Es ist zu beachten, dass einige Fasern eine höhere Spannung als 0,70 der UTS aufweisen und daher auch höhere Spannungsverluste zu erwarten sind. Bei einigen Fasern tritt auch eine geringere Spannung als 0,70 der UTS auf, aber wie in Abb. 5 dargestellt, sind Zunahmen von größerer Bedeutung als Abnahmen. Das Gesamtverhalten lässt sich so charakterisieren, dass Drähte nach dem Auf- und Abwickeln höhere Relaxationsverluste aufweisen als vor dem Aufwickeln.

## congresol® – für besseren Beton.

Die **congresol®**-Produkte wurden speziell für den Einsatz in der Betonindustrie zur Verbesserung der Produktqualitäten entwickelt.

### Anwendungsvorteile:

- höhere Grünstandfestigkeiten
- bessere Verdichtungseigenschaften
- Reduzierung des Ausblühverhaltens
- bessere Oberflächenqualität
- plastifizierende Wirkung
- geringeres Absetzen
- Reduzierung der Gesamtporosität
- höhere Stabilität gegenüber schwankenden Wassergehalten
- verbesserter Produktionsablauf
- weniger Nachbesserungsarbeiten



Stephan Schmidt Gruppe  
Bahnhofsstraße 92  
65599 Damburg/Langendernbach  
Fon +49 (0) 6436 / 609-0  
Fax +49 (0) 6436 / 609-49  
congresol@schmidt-tone.de  
www.schmidt-tone.de

KOMPETENZ IN TON.

Ein Unternehmen der  
**stephan schmidt**  
gruppe

## DER SCHMIER-EXPERTE



**simalube – der automatische Schmierstoffspender für den wirtschaftlichen und zuverlässigen Einsatz**

- Reduziert Wartungskosten
- Einzigartige Technologie
- Umweltfreundlich einsetzbar



**simalube®**  
smart lubrication

**simatec ag** Switzerland [www.simatec.com](http://www.simatec.com)



## Bereit für Ihre Bauprojekte.

Die innovativen Mischanlagen steigern Ihre Beton-Qualität und Ihr Leistungsvermögen. Gleichzeitig überzeugen die Amix-Mischtechnologie und die durchdachte Prozess-Steuerung durch unerreichte Zuverlässigkeit. Gepaart mit dem Ammann Kundendienst garantiert dies eine maximale Verfügbarkeit der Anlage über den ganzen Lebenszyklus hinweg.

**Ammann Schweiz AG**  
CH-4901 Langenthal  
Tel. +41 62 916 61 61  
info.aag@ammann-group.com  
www.ammann-group.ch

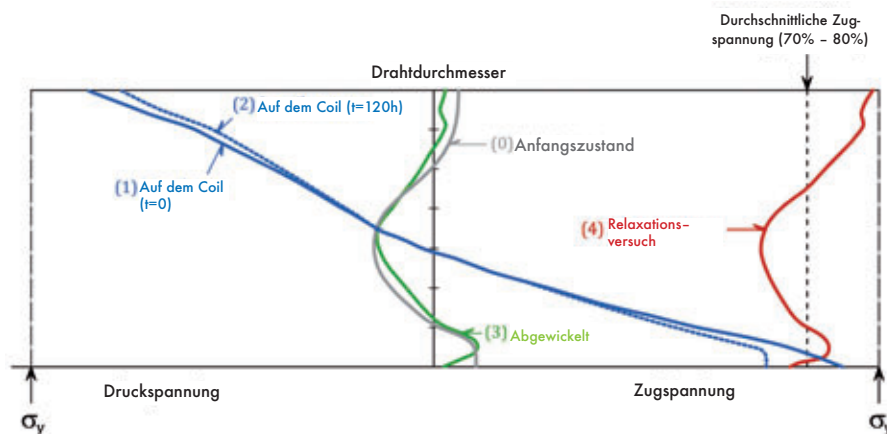


Abb. 7: Spannungsprofile eines Drahtes mit Anfangsspannung während des Auf- und Abwicklungsvorgangs

### Relaxationsverluste bei unterschiedlichen Spannungen

Zur Bestimmung des Materialverhaltens bei unterschiedlichen Anfangsspannungen (im Modell benötigte Daten) in einem 120-Stunden-Versuch (Abb. 5) standen lediglich zwei Versuchsergebnisse zur Verfügung (70 % und 80 % der maximalen Zugspannung), der übrige Teil der Kurve wurde gemäß den Arbeiten von Atienza und Elices geschätzt [12].

### Einfluss der Eigenspannung

Besteht auch nach der Stabilisierung noch eine Anfangsspannung, ergibt sich gemäß Abb. 7 ein vergleichbarer Verlauf der Spannungsprofile. Die Eigenspannung kann die Auswirkungen des Aufwickelns verstärken und in einigen Fällen sogar zu einer Plastifikation der äußeren Fasern führen.

### Einfluss anderer Faktoren

#### Temperatur

Eine Temperaturerhöhung führt zu einem erhöhten Relaxationsverlust; wie von Rostásy [3, 4] untersucht, können bereits Temperaturen von etwa 40 °C zu einem signifikant höheren Relaxationsverlust führen. Daher kann die Lagertemperatur Auswirkungen auf einen nach dem Abwickeln durchgeführten Relaxationsversuch haben. Die Autoren haben diesen Faktor untersucht [13] und herausgefunden, dass er durchaus Auswirkungen auf den endgültigen Relaxationsverlust hat, jedoch bei Temperaturen von bis zu 40 °C zu vernachlässigen ist.

#### Lagerungsdauer

Da der Relaxationsverlust mit der Zeit zunimmt, kann eine Langzeitlagerung zu besonders hohen Relaxationsverlusten führen. Daher verwenden einige Bauunternehmer generell keine vorgespannten Drähte, die länger als ein Jahr gelagert wurden.

### Vergleich der durch Versuche und mit Hilfe des Analysemodells ermittelten Ergebnisse

Tab. 3 zeigt die Vorhersagewerte für den Relaxationsverlust im Vergleich mit den Messwerten. Die Übereinstimmung wird angesichts der Einfachheit des Modells als zufriedenstellend bewertet. Besonders gute Ergebnisse lassen sich erzielen, wenn realistischere Bedingungen zugrunde gelegt werden, wie zum Beispiel bei abgewickelten Enddurchmessern von 9.000 mm und 1.000 mm. Der erste entspricht einem Trommeldurchmesser von 1.500 mm und damit in Übereinstimmung mit den betreffenden Empfehlungen dem 225-Fachen des Drahtdurchmessers.

### Schlussfolgerungen

1. Die von Praktikern gesammelte Erfahrung, der zufolge das Aufwickeln auf geringe Durchmesser zu erhöhten Relaxationsverlusten führen kann, konnte nachgewiesen werden.
2. Eigenspannungen durch Aufwickeln stellen eine zusätzliche Quelle für einen Relaxationsverlust dar, wenn der Draht belastet wird.
3. Ein einfaches Analysemodell reicht zur Vorhersage der Entwicklung des Relaxationsverlustes nach dem Abwickeln aus und liefert einen Anhaltspunkt für den Umgang mit kleinen Durchmessern oder hohen Anfangsspannungen. Die Genauigkeit der Ergebnisse kann durch eine Verfeinerung des Modells und der Ausgangsdaten verbessert werden.
4. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die nachteiligen Auswirkungen des Aufwicklungsvorgangs vernachlässigt werden können, sofern die in den einschlägigen Normen enthaltenen Anforderungen



gen (Mindestdurchmesser Coil) berücksichtigt werden. Einige weitere Faktoren wie die Anfangsspannung, Langzeitlagerung oder Lagerung bei Temperaturen über Raumtemperatur, die schwer zu kontrollieren sind, können einen Relaxationsverlust auslösen oder verstärken. Daher sind die Autoren der Ansicht, dass eine Messung dieser Krümmung vor dem endgültigen Vorspannvorgang gemäß den Anforderungen einiger Normen ausdrücklich zu empfehlen ist, da sich der Relaxationsverlust infolge des Aufwickelns und der Langzeitlagerung so wesentlich genauer ermitteln lässt als durch ein einfaches Messen des Trommeldurchmessers des Coils.

### Danksagung

Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung des vorliegenden Forschungsprojektes durch das Ministerio de Ciencia e Innovación im Rahmen der Förderprogramme BIA-2008-03523 und DPI-2011-24876. F. Suárez ist darüber hinaus der Fundación Agustín Betancourt für die bewilligten Forschungsmittel zu Dank verpflichtet.

Zudem bedanken sich die Autoren bei der Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) für die finanzielle Unterstützung im Rahmen der Initiative Consolider-Ingenio 2010, bei José Miguel Martínez Palacio für seine unschätzbare Hilfe bei der Darstellung der im vorliegenden Beitrag präsentierten Zahlen sowie bei Luis del Pozo und Luisa Villar von Emesa Trefilería, S.A. (Arteixo, La Coruña, Spanien) für die Zurverfügungstellung der Stahlstränge als auch ihre sachdienlichen und nützlichen Hinweise.

### Literatur

- [1] EN ISO 15630-3 (2010) "Steel for the reinforcement and prestressing of concrete – Test methods".
- [2] ASTM E328-86 (1996) e1 "Standard test methods for stress relaxation tests for materials and structures".
- [3] Rostásy F.S. and Schütt K. (1989) "Relaxation of cold-drawn prestressing steel under stationary and transient elevated temperature", in: Transactions of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, Ed. A.H. Hadjan (10th SMIRT) (Los Angeles), Vol. 6, pp. 189-194.
- [4] Rostásy F.S. and Thienel K-Ch. (1991) "On prediction of relaxation of cold drawn prestressing wire under constant and variable elevated temperature", Nuclear Engineering and Design, 130, pp. 221-227.
- [5] Atienza J.M. and Elices M. (2004) "Influence of residual stresses in the stress relaxation of cold drawn wires" Mater Struct, 37, 301-304.
- [6] Atienza J.M., Elices M., Ruiz-Hervás J., Caballero L. and Valiente A. (2007) "Residual stresses and durability in cold drawn eutectoid steel wires". Metals and Materials International, Vol.13, Number 2, 139-143.
- [7] EHE-08. Code on Structural Concrete. Publicaciones del Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica. Section 70.2.1.1.
- [8] Fib. Bulletin 55. Model code 2010. First complete draft, vol. 1. Section 5.3.6, pp. 187-190.
- [9] Atienza J.M., Ruiz-Hervás J., Martínez-Pérez M.L., Mompeán F.J., García-Hernández M. and Elices M. (2005) "Residual stresses in cold drawn pearlitic rods". Scripta Materialia, 52, 1223-1228.
- [10] Ruiz Hervás J., Luzin V., Prask H. Gnaeupel-Herold T. and Elices M. (2006) "Effect of thermomechanical treatments on residual stresses measured by neutron diffraction in cold-drawn steel rods". Mater Sci Eng A, 435-436, 725-735.
- [11] EN 10138:2009. Prestressing steels. CEN, Brussels. Sections 10.3.1 and 10.3.2.
- [12] Atienza, J.M. and Elices M. (2007) "Role of residual stresses in the stress relaxation of prestressed concrete wires". Journal of Materials in Civil Engineering 19:8, pp 703-707.
- [13] Elices M., Suárez F., Gálvez J.C., Condón D.A. and Atienza J.M. (2011) "Influence of coiling on the stress relaxation of prestressing steel wires". Structural Concrete, Vol.12, Number 2, 120-125.

### WEITERE INFORMATIONEN

Universidad Politécnica de Madrid  
Departamento de Ciencia de Materiales,  
Departamento de Ingeniería Civil: Construcción,  
E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos, c/ Profesor Aranguren s/n  
28040 Madrid, Spain  
[www.upm.es](http://www.upm.es)



## Revolutionäre Anwendung für Betonbewehrungen im Hoch- und Tiefbau

Bombril hat sich mit seinen **GEWELTEN STAHLFASERN** zu einem der marktführenden Unternehmen der brasilianischen Bauindustrie entwickelt. Dieses Produkt ist für Betonbewehrungen geplant und verbessert – in noch höherer Qualität und zu einem wettbewerbsfähigen Preis – die Beständigkeit des Betongefüges.



Überlegene Leistungsfähigkeit des Betons mit **10 % bis 30 % Einsparpotenzial** gegenüber konventionellen Verfahren, minimale Rissbildungen, verbesserte Betonzähigkeit, hohe Zugfestigkeit zu niedrigen Kosten.

**ANWENDUNGEN:** Decken für Industriegebäude und Lagerhäuser, Metallverbunddecken, Betonfertigteildecken, Spritzbeton, Bergbau, Wohnungsbau, Fundamente, Kellerdecken und -wände, isolierte Formen, Pflasterbau und andere öffentliche Bauvorhaben.

